

内蒙古上伙房地区铀钼矿物化探综合找矿方法及找矿模式

王世成, 于兵, 王常东, 郝晓飞, 董小宇, 林天发, 余弘龙

(核工业二四三大队, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 沽源-红山子地区是中国北方重要的铀成矿带, 红山子岩体位于沽源-红山子铀成矿带北段。在红山子岩体东部上伙房地区, 采用地质、地球化学、地球物理多学科综合信息找矿方法开展了找矿工作。利用土壤地球化学和氦气测量手段圈定化探异常并缩小了找矿范围, 结合激电异常中高阻高极化特征和地面高精度磁测异常形态, 解译了上伙房地区构造格架展布; 激电测深进一步揭示了深部异常空间展布形态, 可控源音频大地电磁测深解译出更深部成矿有利空间, 有效预测了铀钼矿体空间定位, 经钻探验证发现多条铀钼矿体。依据勘查结果对各方法进行探索, 建立了上伙房地区地质-地球化学-地球物理综合找矿方法及找矿模式, 为本地区铀多金属矿勘查提供了找矿方向。

关键词: 铀钼矿; 物化探方法; 红山子岩体; 找矿方向; 找矿模式

中图分类号: P619.14; TE122; P631.4; P631.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0015-12

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.07.11

红山子岩体位于沽源-红山子铀成矿带北段^[1-3], 已发现红山子铀钼矿床、小东沟钼矿床、南窝铺铀矿床及众多铀钼矿化异常^[4-5]。红山子岩体东部的上伙房地区地表玄武岩及第四系覆盖, 矿化信息、构造行迹不明显, 找矿难度大^{[6]486}, 前期勘查仅在花岗斑岩出露部位揭露到较富的工业铀钼矿体。为有效评价研究区成矿潜力, 总结成矿规律, 预测矿体空间定位并扩大找矿成果, 急需总结一套快速、有效的物化探综合找矿方法。高精度磁法的测量深度一般在300 m左右, 可对工作区地层、岩体和断裂构造的对应关系进行研究^[7]; 大功率激电中梯法可有效圈定视极化率的平面特征, 在寻找金属硫化物矿床, 尤其是浸染状金属硫化物矿床中效果显著^[8-9]; 土壤氦气测量可较为直接寻找铀矿体和含铀构造破碎带^[10]; 可控源音频大地电磁测量具有勘探深度大、分辨率高、工作效率高等特点, 广泛应用于探测地下隐伏构造及深部矿体^[11-12]; 岩石化探测量可有效查明异常区内金属元素分布及富集特征^[13]。

各类物化探方法的精度和效果受探测深度、露头好坏、植被覆盖程度等多方面因素影响, 将多种物化探方法优势结合, 可有效提高综合探测效果^[14-15]。笔者通过对多种物化探方法进行组合, 建立了研究区地质-地球化学-地球物理综合找矿模式, 为区内铀多金属勘查评价提供参考。

1 地质概况

研究区位于索伦山-西拉沐沦结合带, 是古生代古亚洲洋构造域与中生代滨西太平洋构造域转换叠加区域(图1a, 据参考文献[16]修改)。区内地质运动期次多、火山作用强烈、构造发育, 出露地层由古生界和中新生界组成, 古生界分布有二叠统哲斯组(P_1zs)、大石寨组(P_1ds)、上二叠统于家北沟组(P_2y)、林西组(P_3l); 中新界地层由上侏罗统满克头鄂博组(J_3mk)、白音高老组(J_3b)及新近系汉诺坝组(N_1h)组成^[17]。研究区侵入岩主体为燕山期晚期花岗岩, 晚期岩脉发育。区域上铀钼矿床、矿点多分布于红山子-五分地复背斜南东侧,

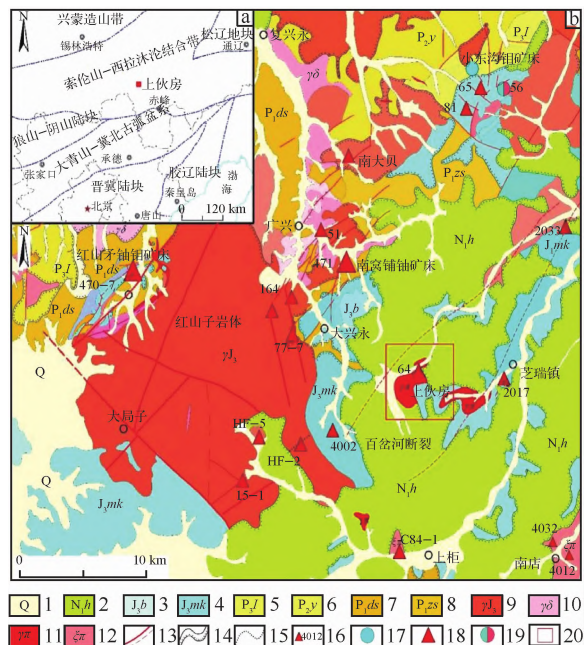
收稿日期: 2025-07-28

基金项目: 中国核工业地质局铀矿资源调查评价项目(202211-1)。

第一作者简介: 王世成(1986—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铀矿勘查。

通信作者简介: 于兵(1992—), 男, 吉林长春人, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为地球物理勘探。

总体展布受 NE 向断裂带控制;铀钼矿成矿与晚期岩脉分布关系密切,铀钼矿体的定位受次级 NE、NW 以及 SN 向张性断裂构造结点控制(图 1b)。



(a)位置图;(b)区域地质图。

- 1—第四系;2—新近系汉诺坝组;3—上侏罗统白音高老组;
4—上侏罗统满克头鄂博组;5—上二叠统林西组;6—中二叠统于家北沟组;7—下二叠统大石寨组;8—下二叠统哲斯组;
9—燕山期花岗岩;10—花岗闪长岩;11—花岗岩;
12—正长斑岩;13—实测及推测断裂;14—地质界线;
15—岩相界线;16—铀异常点及编号;17—钼矿床;
18—钼矿床;19—铀钼矿床;20—研究区范围。

图 1 研究区位置及区域地质图

Fig. 1 Location of the study area and regional geological diagram

研究区位于百岔河断裂带中段(图 2),处于广兴—芝瑞盆地中部,基岩出露整体较差,北部和东部被玄武岩覆盖,中部出露花岗岩斑岩、闪长玢岩等次火山岩体,部分花岗岩斑岩具隐爆特征^[18];断裂主要发育 NE、NW 两组,NE 向断裂为百岔河断裂带的次级断裂,NW 向断裂形成较晚,将 NE 向断裂切割;矿化受构造控制明显,可划分为一条近 NE 向的主矿化带及一条近 NW 向的次级矿化带^[6]⁴⁸⁶。钼矿赋矿围岩为花岗岩斑岩,部分斑岩发生过隐爆作用,钼矿化呈细脉状、团块状;铀矿化赋存在构造破碎带、隐爆角砾岩带内。强赤铁矿化、萤石化与铀矿化关系密切;硅化、黄铁矿化与钼矿化关系密切,黄铁矿多呈浸染状,存在少量磁黄铁矿。

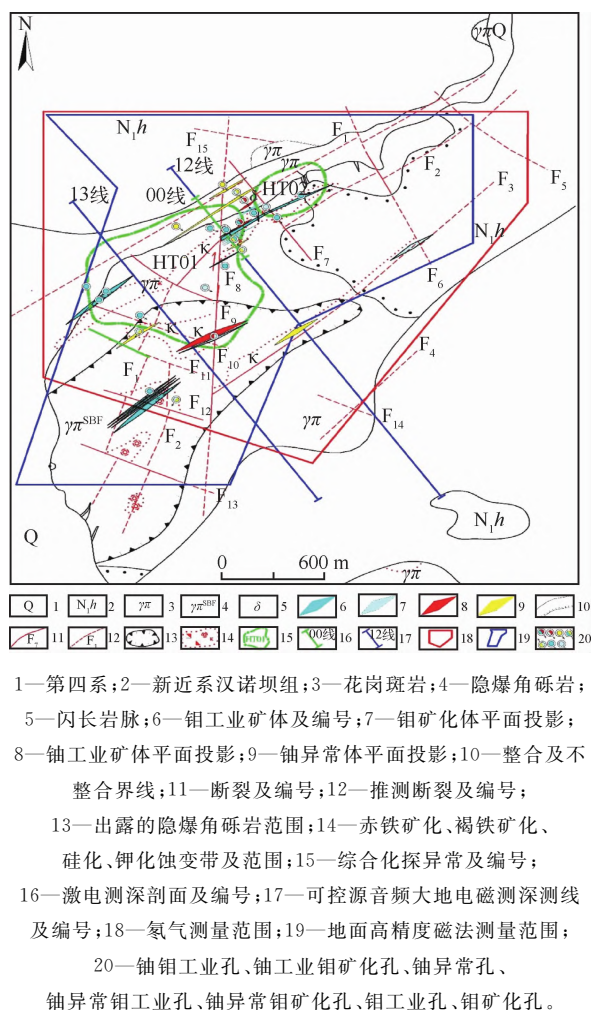


图 2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological schematic diagram of the study area

2 地球化学异常特征

结合以往成果认识,开展 1:10 000 土壤地球化学测量(图 3),网度 200 m×40 m,以了解 NE 向主干断裂的含矿性,查明断裂构造内金属元素分布及富集特征^[19-22]。取样前剥掉上部的风成砂、腐殖土、黄土等盖层,采样深度距地表 20~50 cm,取样层位为 B 层(淋积层)或 C 层(母质层),分析金、银、铜、汞、钼、铅、铋、锑、砷、钨、铀、钍和铀等元素,通过数据处理圈定 2 处综合异常,编号分别为 HT01 异常、HT02 异常。异常圈定主要依据有:1)各元素组合异常齐全,异常面积较大(均大于 0.1 km²);2)异常强度高,浓度中心明显,单元异常套合好,异常分带清楚;3)多组单元异常空间上相邻、元素组合相似,并且均受 NE、NW 向断裂构造和花岗岩斑岩控制。HT01 异

常出露岩性为花岗斑岩,异常形状为不规则状,为封闭异常,主要成矿元素 Mo、U、Pb、Zn、Sb 异常受 NE、NW 向断裂构造控制,经地表调查认为该异常属矿致异常。HT02 异常出露岩性为花岗斑岩,异常形状为椭圆形,NE 向展布,为封闭异常,主要成矿元素 Mo、U、Zn 异常受 NE、NW 向断裂构造夹持,地表调查认为属矿致异常。综合分析认为 2 处异常具有良好的找矿前景。

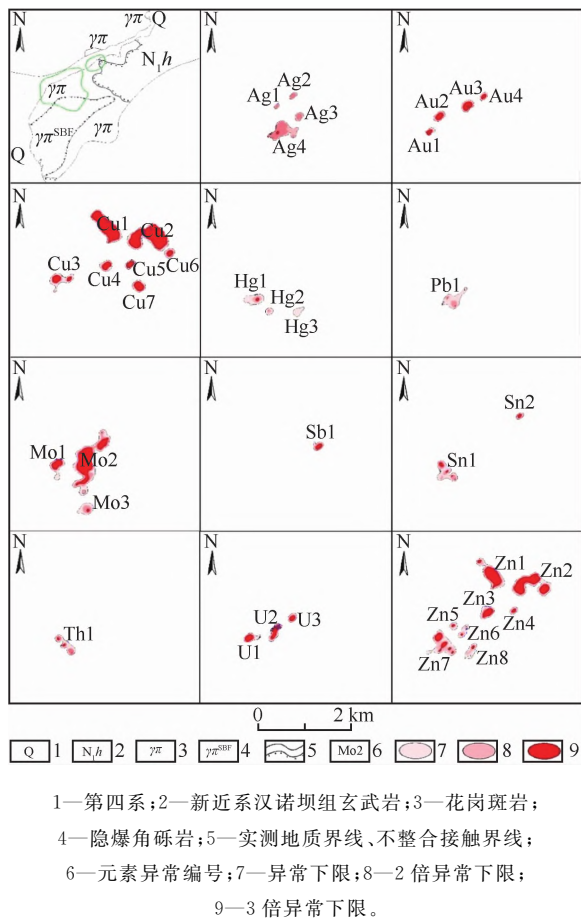


图3 土壤地球化学测量异常剖析

Fig. 3 Anomaly analysis of soil geochemical survey

为了解研究区放射性特征^[23],并验证土壤地球化学 U 异常,开展土壤氡气测量,网度 100 m×40 m,方向 145°。通过对氡气测量数据处理,研究区土壤氡气活度浓度平均值为 3.0 Bq/L,标准偏差为 3.4 Bq/L,异常晕下限为 13.2 Bq/L。共圈定 4 片氡气异常晕(图 4),分别为 D01、D02、D03 和 D04,除 D01、D04 经验证为假异常外,D02 和 D03 异常走向近北西,整体趋势与北东向构造基本吻合,与土壤地球化学 U 异常吻合度好;区

内发现的多个铀工业矿孔、铀矿化异常孔,均分布在氡气异常晕附近。因此,氡气异常由断裂构造控制的隐伏铀矿(化)体引起,土壤氡气测量对覆盖区寻找隐伏铀矿(化)体有较大指导意义。

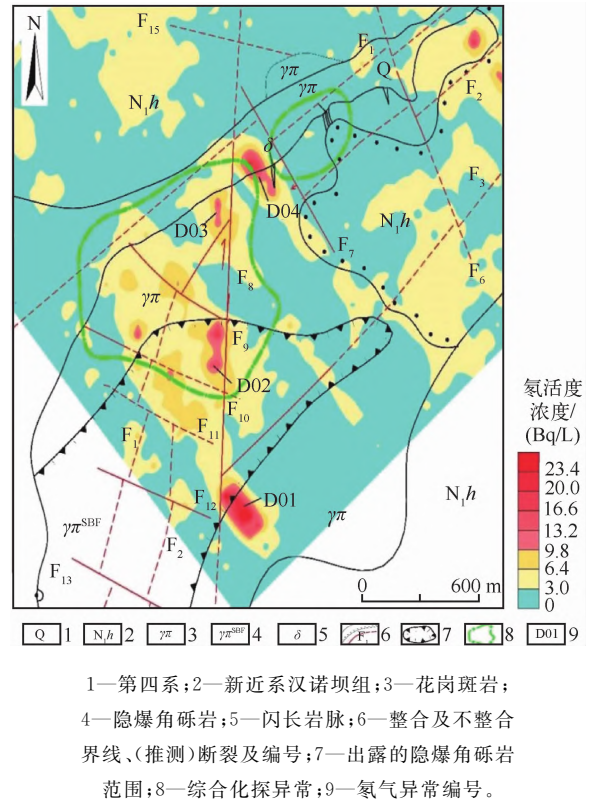


图4 氡气测量异常图

Fig. 4 Abnormal diagram of radon gas measurement

3 地球物理异常特征

3.1 岩矿石物理性质

对研究区内主要岩矿石进行物性参数测量,主要岩矿石磁化率、电阻率和极化率参数见表 1。可以看出,研究区内各岩矿石电阻率、极化率和磁化率变化较大,含矿花岗斑岩具有高阻-高极化-中低磁性特征,与研究区内分布的其他岩石岩性具有较大物性差异。从统计的物性参数可看出,研究区具有开展可控源音频大地电磁测深、地面高精度磁测、激电测量的前提条件,通过电阻率、磁化率的物性参数差异可有效分辨含矿主岩的空间定位;进一步叠加地球物理和地球化学特征差异,可有效分辨受断裂控制且蚀变发育的矿体。

表 1 研究区岩矿石主要物性参数
Table 1 Main geophysical parameters of rock ore in the study area

岩矿石名称	数量/块	电阻率/($\Omega \cdot m$)	极化率/%	磁化率/ $10^{-6}SI$	测定位置
含矿花岗斑岩(硅化、浸染状黄铁矿化)	26	1 910	4.2	690	钻孔岩芯、捡块标本
花岗斑岩	39	1 125	2.1	365	钻孔岩芯、捡块标本
玄武岩	35	425	1.6	13 112	钻孔岩芯、捡块标本
闪长玢岩	31	396	1.7	2 366	钻孔岩芯

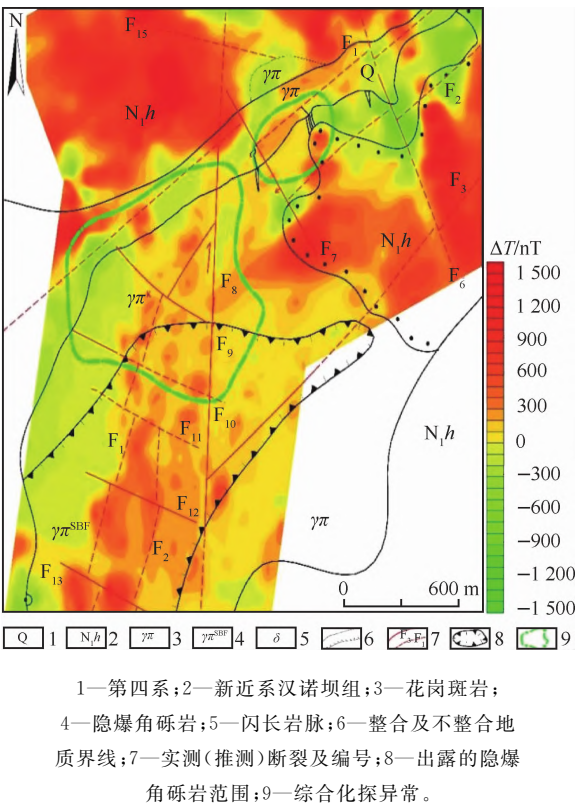
3.2 地面高精度磁测异常特征

为了解研究区主体构造格架及地质体的分布特征^[24-26],在研究区开展 1:10 000 地面高精度磁测,网度 100 m×20 m。从 ΔT 等值线图(图 5)可看出,研究区北部和东部被玄武岩覆盖,显示为高磁异常。沿 F_1 断裂形成了小于 100 nT 的 NE 向低磁异常带,说明该处发育的深大断裂破坏了原磁性地质体的磁性,推断此断裂为研究区内北东向百岔河主断裂的次级断裂。以 F_1 深大断裂为界,北部表现为低磁异常区,与其岩性花岗斑岩磁异常特征吻合良好。南部主要表现为中低正磁异常区,局部存在负异常,异常梯度较大, ΔT 在 0~350 nT 间变化,地表出露岩性为花岗斑岩,在花岗斑岩体内可见部分较高的正异常,推测该区域位于深大断裂下盘,断裂构造发育,多期次热液活动将磁化物质带入断裂构造内导致局部磁化率升高,图中的异常形态可较好反映断裂构造的发育方向。

地质调查发现,区内 NE 向、NW 断裂均发育,且 NW 向断裂错段 NE 向断裂,推测 NW 向断裂为 NE 向张性断裂的派生断裂,形成时间稍晚,结合区内高精度磁测条带状和串珠状正异常,可推断出多组 NE 向和 NW 向断裂。综合以上结论认为,区内磁异常很好地反映了隐伏构造的存在,对断裂分布、形成时间顺序可作定性推测,对区内寻找受断裂构造控制的热液脉型铀多金属矿具有较好指导意义。

3.3 激电中梯异常特征

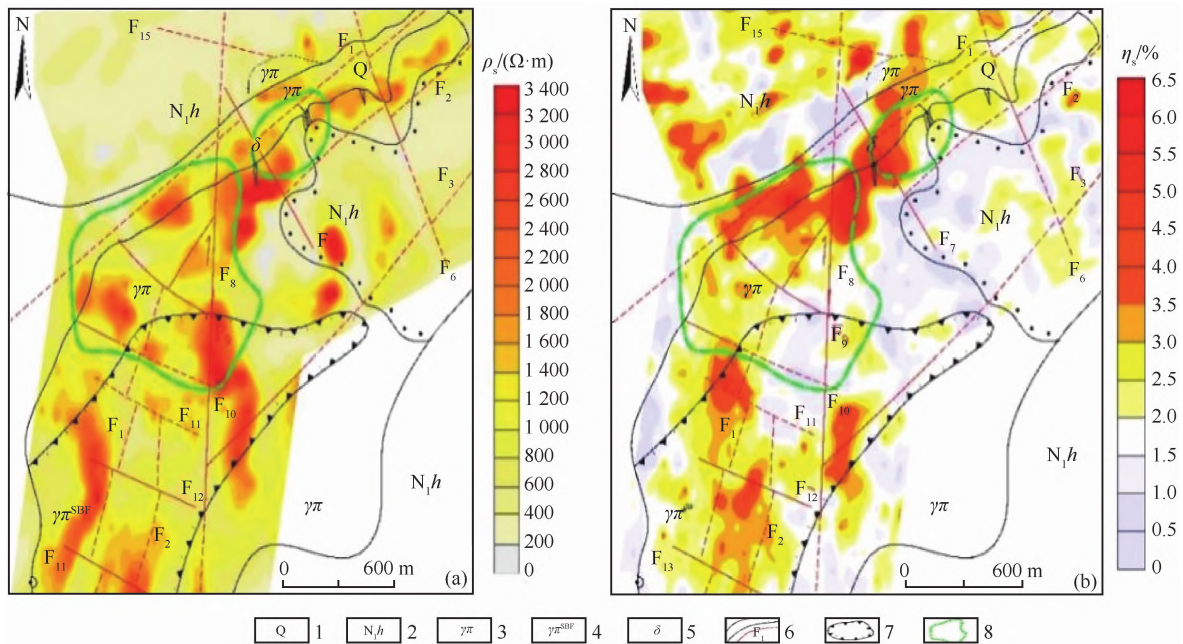
为进一步圈定深部铀多金属矿化带的分布范围及空间展布特征^[27-28],在 2 处土壤地球化学测量异常区域及外围开展激电中梯测量,供电极距为 1 500 m,测量极距选取 40 m,测线方向垂直于北东向主断裂及土壤地球化学铀钼异常长轴方向。



1—第四系;2—新近系汉诺坝组;3—花岗斑岩;
4—隐爆角砾岩;5—闪长岩脉;6—整合及不整合地
质界线;7—实测(推测)断裂及编号;8—出露的隐爆
角砾岩范围;9—综合化探异常。

图 5 地面高精度磁测 ΔT 异常图
Fig. 5 ΔT anomaly diagram of ground high
precision magnetic survey

激电中梯测量(图 6)结果显示,以视电阻率(ρ_s)大于 1 000 $\Omega \cdot m$ 和视极化率(η_s)等于 3.5% 作为异常下限圈定的高阻高极化异常区,主要分布于研究区中南部,视极化率和视电阻率异常均存在较为明显的异常中心,异常规模较大,整体展布与北东向断裂相近,和土壤地球化学异常套合良好。运用激电中梯测量进一步确定了构造蚀变带和矿化体范围、位置等特征,构造蚀变带和金属矿化体总体表现为“中高阻-高极化”特征。



(a) 激电中梯测量电阻率异常图; (b) 激电中梯测量极化率异常图。

1—第四系; 2—新近系汉诺坝组; 3—花岗斑岩; 4—隐爆角砾岩; 5—闪长岩脉; 6—整合及不整合界线、(推测)断裂及编号;
7—出露的隐爆角砾岩范围; 8—综合化探异常。

图6 激电中梯测量异常图

Fig. 6 Ladder measurement anomaly diagram in IP

3.4 激电测深异常特征

在土壤地球化学测量 Mo 异常、激电中梯高阻高极化异常区和 F_1 构造蚀变带上, 布设一条激电测深 00 线(图 2), 采用对称四极装置, 点距 40 m; 在钼异常浓集中心附近、激电中梯异常中心处, 点距加密至 20 m, 最大供电电极距 1 500 m, 大致查明 F_1 断裂在深部的延伸情况和矿化体空间赋存状态^[29]。

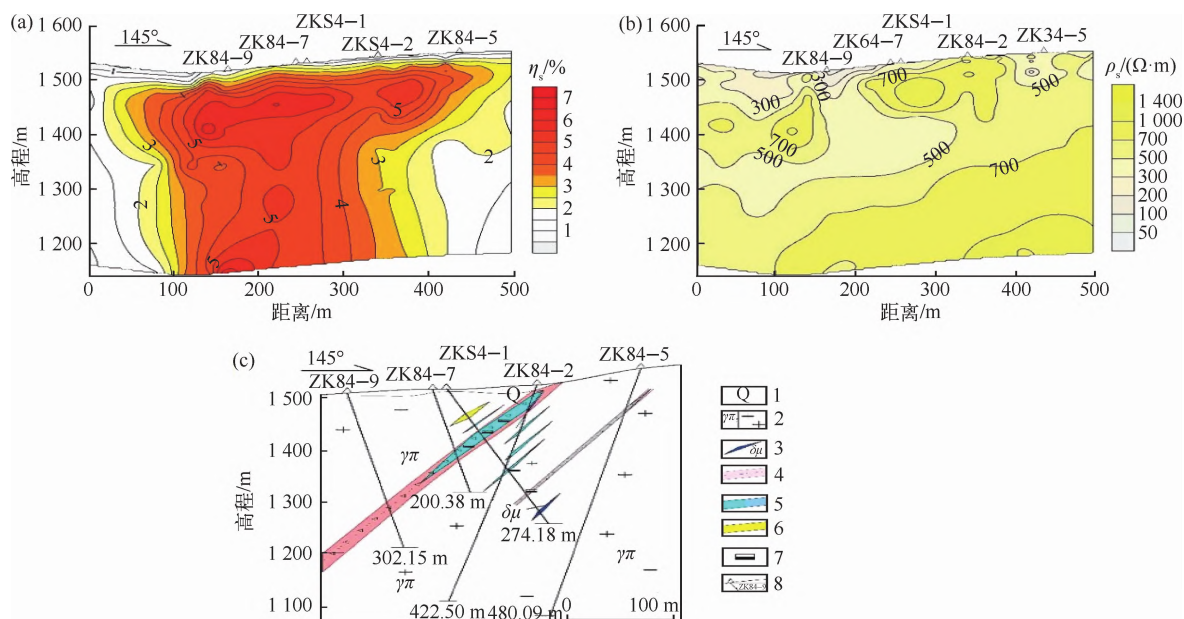
00 线地质-物探综合剖面见图 7。可以看出, 存在 2 个明显的中-高阻电性体, 以 $500 \Omega \cdot m$ 等值线为界, 分别位于断面图水平距离 100 m、标高 1 350~1 480 m 范围和水平距离 300 m 至线末端, 断面左侧中-高电性体形态较为规则、规模较小; 300 m 处中-高电性体由浅部向深部倾斜连续延伸, 2 个中-高阻体被一低阻体带分割, 推断其为 F_1 断裂。

与此对应的视极化率断面图显示, 视极化率异常形态呈“树干状”、规模较大, 以视极化率 3.5% 圈定的高极化体, 其分布位置、形态、规模与电阻率断面图基本一致。较大规模的中-高阻体与土壤地球化学测量中的 Mo 异常对应较好, 结

合研究区岩石物性特征、地质特征, 推测此异常为矿致异常, 是由 F_1 构造蚀变带和多金属矿体引起, 其带状连续延伸特征大体反映了 F_1 构造蚀变带和多金属矿体在深部的延伸趋势, 300 m 处中-高阻、高极化异常体整体向北西方向倾斜(倾角约 50°), 反映了 F_1 构造蚀变带和多金属矿体的大致产状。100 m 处下方的中-高阻、高极化异常, 规模相对较小, 对应的土壤地球化学测量剖面中存在相对较弱的 Mo 异常, 结合研究区岩石物性特征、地质特征, 可能存在一定规模的金属矿体。

3.5 可控源音频大地电磁测深异常特征

由于激发极化法的探测深度相对较浅, 为了了解和预测构造蚀变带深部成矿空间, 应用探测深度更大的可控源音频大地电磁测深(以下简称 CSAMT)方法, 获取较高分辨率的深部信息^[30-34]。在 NE 向构造蚀变带和激电测深剖面基础上, 布设 2 条可控源音频大地电磁测深剖面, 方向 145° , 点距 40 m, 收发距为 20 km。本次测量使用加拿大凤凰公司生产的 V8 多功能电法仪, 采用赤道偶极装置的标量测量方式, 采集数据后进行数据整理、预处理、远区数据频点选择、静态校正等, 使用 MT-Pioneer 软件进行数据反演。



(a) 激电测深视极化率(η_s)断面图;(b)激电测深视电阻率(ρ_s)断面图;(c)勘探线剖面图。

1—第四系;2—花岗斑岩;3—闪长玢岩脉;4—构造破碎带;5—钼矿(化)体;6—铀异常体;7—辉钼矿化;8—钻孔位置编号。

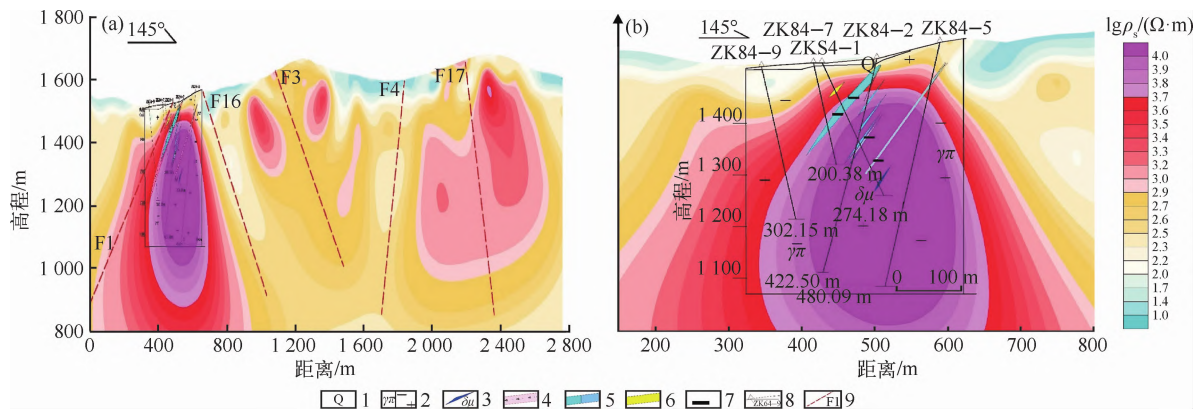
图7 00线地质-物探综合剖面图

Fig. 7 Comprehensive geologic and geophysical profile of Line 00

12线二维视电阻率反演断面图中清晰地反映出低电性体(电阻率小于 $300\ \Omega\cdot\text{m}$)、中电性体(电阻率 $300\sim 1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$)和高电性体(电阻率大于 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$)(图8)。一部分低电性体位于地表,分布于中-高电阻率电性体上层,主要由第四系黄土和玄武岩盖层引起;另一部分低电性体位于中-高电阻率电性体两侧,从浅部向深部延伸,连续性较好、规模较大,推断为由导电性较好的含水构造破碎带引起。中电性体和高电性体分布较为广泛、规模较大,由浅部向深部延伸,主要由花岗斑岩引起;结合研究区构造蚀变带和铀多金属矿石具有的“中-高阻”电性特征,推断中-高电性体为成矿体有利找矿部位。中-高电性体沿垂向延伸较大,其形态特征表明 F_1 构造蚀变带深部延伸依然存在,预示深部仍有较好的找矿前景。另外,电性剧烈变化的区域,往往预示着地质体或岩性、构造等的变化,通常是矿化或变异部位,属于有利的找矿靶区。通过此方法推断的 F_1 、 F_3 和 F_4 断裂与磁法测量所推断断裂吻合较好,增加了磁法推断断裂的可靠性, F_3 和 F_{17} 断裂附近具有与 F_1 构造蚀变带相似的电性特征,推断上述2处

为成矿有利部位。通过钻探工程验证了上述推断的真实性,为后续工作提供了指导。

从13线二维视电阻率反演断面图(图9a)可看出,中电性体和高电性体分布范围大,从浅部向深部延伸,连续性较好、规模较大,整体形态不规则,略向北西向倾斜,与12线相似,推断该中-高电性体为成矿有利部位;低电性体主要分布在测线起点与终点附近,地表主要由第四系黄土和残坡积物引起,另一部分低电性体位于中-高电阻率电性体两侧,从浅部向深部延伸,连续性较好、规模较大,推断为深大含水构造破碎带引起。在 F_1 构造蚀变带内施工ZKSH23-5钻孔(图8b),揭露钼矿体厚度8.4 m,验证了钼矿体主要赋存在中-高阻电性体内;在 F_1 与 F_3 之间的高电性体和D02氦气异常周边,通过钻孔ZKSH23-12发现铀矿体厚度1.1 m,以及深部的钼矿化体,验证了铀矿体主要分布在中-高电性体内和氦气测量在铀矿勘查中的有效性。可控源音频大地电磁测深的测量成果,佐证了土壤地球化学异常与激电异常,查明了断裂构造的更深部产状信息及空间展布特征,圈定了更深处的成矿有利空间。

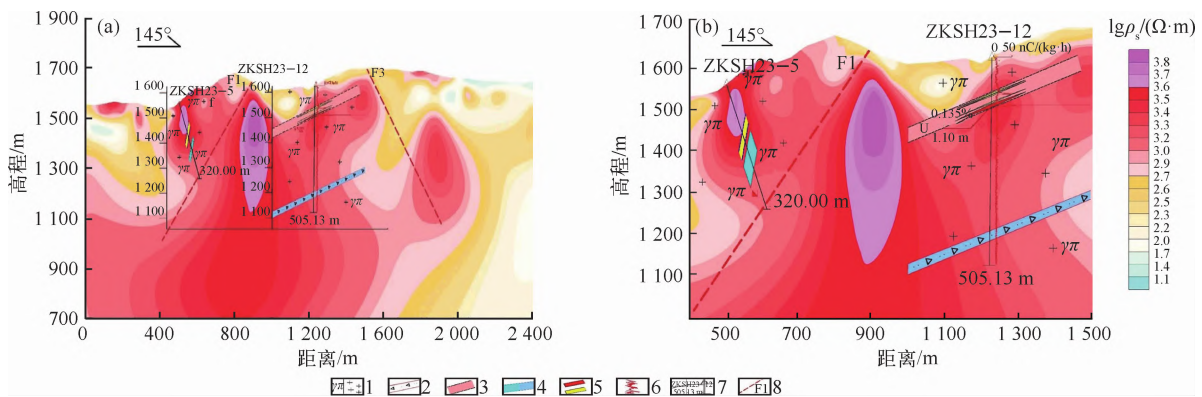


(a)可控源音频大地电磁测深二维视电阻率反演断面图;(b)勘探线剖面图。

1—第四系;2—花岗斑岩;3—闪长玢岩脉;4—构造破碎带;5—钼矿(化)体;6—铀异常体;7—辉钼矿化;
8—钻孔位置编号;9—推断断裂及编号。

图8 12线地质-物探剖面图

Fig. 8 12-line geological-geophysical profile



(a)可控源音频大地电磁测深二维视电阻率反演断面图;(b)勘探线剖面图。

1—花岗斑岩;2—构造破碎带;3—硅化、赤铁矿化蚀变带;4—钼(化)矿体;5—铀工业矿体、铀异常体;6—伽马测井曲线;
7—钻孔位置及编号;8—推断断裂及编号。

图9 13线地质-物探剖面图

Fig. 9 13-line geological-geophysical profile

4 技术方法组合及找矿效果分析

通过化探测量可以解译金属元素组合及分布规律和富集特征;通过氦气测量可获取浅部构造信息及放射性特征,结合地质特征可有效缩小找矿靶区和目标,但其对深部信息的提取存在局限性;需要借助地球物理方法定位断裂及矿化空间位置。通过钻孔资料分析,并采用激发激化法可定位矿体位置。氦气测量可推断出与铀矿化体相关的构造裂隙;磁法测量不仅可了解各地质体的

分布位置,也可获取完整岩浆热液活动情况,二者相互验证增加了推断断裂的真实性。激电测深可大致推断浅部构造及矿化体的产状信息,可控源音频大地磁法测量(CSAMT)实现对更深部断裂构造的空间分布特征信息的获取,结合浅部构造的空间分布特征,可对深部成矿潜力进行更可靠的预测评价。此外,化探测量与激电测量组合在多金属矿体深部空间定位过程中效果明显,二者组合可提高多金属矿的找矿效率。

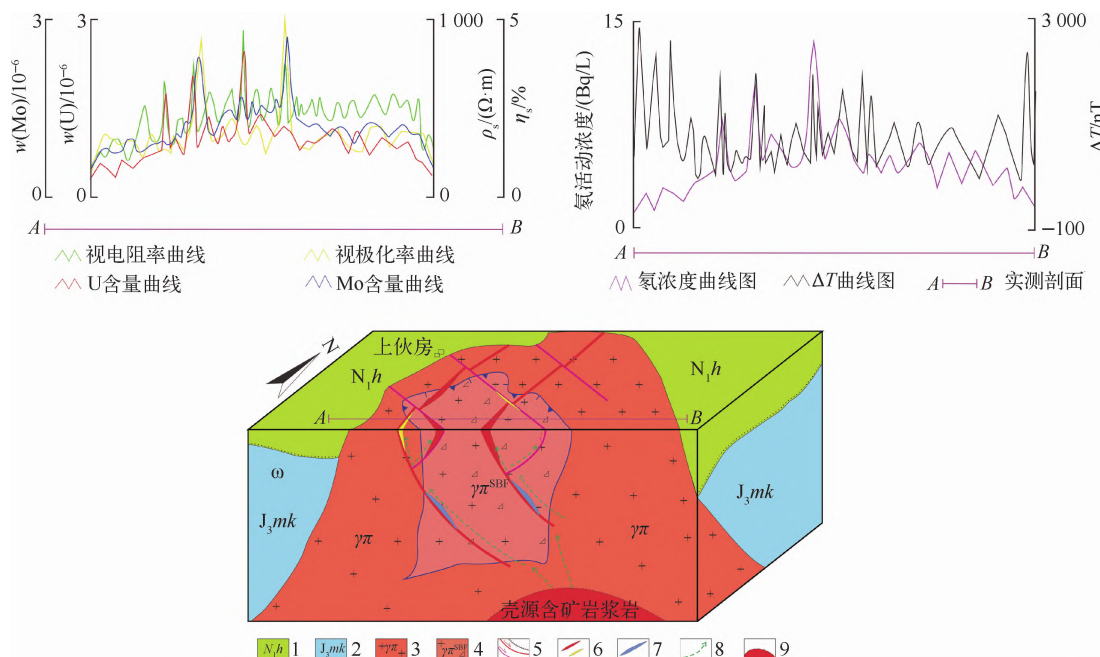
根据以上研究和论证,提出“化探扫面+土壤

氦测量+磁法扫面+激电测量+CSAMT”组合方法,并形成了一套工作流程:即根据化探异常、氦气异常圈定找矿远景区;通过氦气测量确定浅部放射性异常空间分布,通过激电异常推断多金属矿化体的空间分布;通过氦气测量、磁法扫面解决控矿构造、赋矿构造的空间分布特征;通过CSAMT确定控矿构造、赋矿构造的深部延伸规模,评价成矿潜力。在研究区经钻探验证,该组合方法与工作流程能够有效解决因浅覆盖区地表矿化信息、构造行迹不明带来的找矿难题。

5 综合找矿模式

根据研究区铀钼矿化及物化探特征,提取研

究区成矿要素(表2),并建立地质-地球化学-地球物理综合找矿模式(图10),即在花岗斑岩等侵入岩区域 Mo-U-Pb-Zn 化探异常与氦浓度增高地段、高电阻率、高极化率、中磁性特征叠合位置,寻找有次级 NE、NW 以及 SN 向张性断裂构造结点,开展深部验证。根据该模式,在研究区圈定找矿靶区,定位含矿断裂、预测赋矿空间位置,开展钻探验证并发现了较好的铀钼矿化线索。到目前为止,研究区共发现多个铀工业矿孔、20 余个钼工业矿孔。勘查成果表明,该综合找矿方法和找矿模式可有效指导研究区的后续勘查工作,也可地质条件相近地区的勘查与评价工作提供找矿范例。



1—新近系汉诺坝组;2—上侏罗统满克头鄂博组;3—花岗斑岩;4—隐爆角砾岩;5—断裂构造;
6—铀工业矿体、异常体;7—钼工业矿体;8—岩浆活动方向;9—壳源含矿岩浆岩。

图 10 研究区地质-地球化学-地球物理综合找矿模式图(据参考文献[6]⁴⁸⁹修改)

Fig. 10 Integrated geological, geochemical and geophysical prospecting model of the study area
(modified after reference [6]⁴⁸⁹)

6 结论

1)内蒙古上伙房地段铀钼矿化赋矿围岩为花岗斑岩,矿化展布受次级 NE、NW 向断裂构造控制,构造、蚀变叠加部位 Pb、Zn、U 和 Mo 等综合地球化学元素异常发育。

2)研究提出了“化探扫面+土壤氦测量+磁法扫面+激电测量+CSAMT”组合方法,并形成了一套工作流程。氦气测量可快速、初步直接探测覆盖区隐伏铀矿体出露范围,同时对断裂构造有较好的识别作用;磁法测量建立起研究区断裂构造格架;激电测量确定了成矿地质体具有

“中高阻-高极化”的特征,直接定位成矿有利空间;通过开展 CSAMT 查明深部断裂构造产状及

展布特征,解译了 5 条断裂构造,圈定 3 处找矿有利部位。

表 2 研究区成矿要素及找矿标志一览表

Table 2 Metallogenic elements and ore prospecting indicators in the study area

成矿要素	找矿标志	矿化指示特征或信息
地质条件	构造	北东向主构造与北西向次级构造交汇,主控矿构造为北东向,北东、北西两组构造均为赋矿构造
	岩浆岩	晚侏罗世花岗斑岩
	围岩蚀变	铀矿:赤铁矿化、萤石化;钼矿:硅化、黄铁矿化
	成矿作用	矿化赋存于花岗斑岩裂隙蚀变带、构造带内,部分斑岩具有隐爆作用,成矿作用是深部含矿热液通过隐爆—构造系统运移至浅部区域沉淀富集
	矿石矿物	辉钼矿、黄铁矿等
地球化学	铀钼矿体元素分布	U、Mo 呈强富集、强分异特征,中低温元素异常分带
	矿物元素异常组合	异常元素组合为 Mo-U-Pb-Zn
	主要元素异常形态与分布范围	以中高温元素异常为中心,低温异常分布其外围,异常规模较大、强度较高、浓集中心较为明显,元素套合好
地球物理	探测目标	花岗斑岩
	目标物物性特征	氢浓度增高地段、高电阻率、高极化率、中磁性
	深部异常特征	CSAMT 中高阻电性体为成矿有利部位

3)综合研究成矿地质条件、矿体特征、地球物理特征及地球化学特征等要素,建立了研究区地质-地球物理-地球化学综合找矿模式,并经钻探工程验证了该找矿模式能够进一步缩小找矿范围,极大地提高找矿效率。

参考文献:

- [1] 祝洪涛,吴仁贵,姜山,等.内蒙古红山子复式岩体地质时代的厘定及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2019,38(4):453-464.
ZHU Hongtao, WU Rengui, JIANG Shan, et al. The definition and geological significance of Hongshanzi complex rock in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2019, 38(4): 453-464(in Chinese).
- [2] 祝洪涛,巫建华,唐大伟,等.内蒙古东部红山子复式岩体晚侏罗世黑云母花岗岩地球化学特征及地质意义[J].地质论评,2020,66(3):765-785.
ZHU Hongtao, WU Jianhu, TANG Dawei, et al. Geochemistry of late jurassic biotite granite in the Hongshanzi area, Hexigten Banner, Inner Mongolia, and its geological implications [J]. Geological Review, 2020, 66(3): 765-785(in Chinese).
- [3] 姜山,巫建华,王常东,等.赤峰托河盆地流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J].高校地质学报,2018,24(6):896-906.
JIANG Shan, WU Jianhua, WANG Changdong, et al. Chronological and geochemical characteristics of the rhyolite in the Tuohe Basin of Chifeng and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(6): 896-906(in Chinese).
- [4] 王常东,巫建华,张海龙,等.红山子复式岩体早白垩世细粒黑云母碱长花岗岩和花岗斑岩的地球化学特征及地质意义[J].地球化学,2019,48(4):356-369.
WANG Changdong, WU Jianhua, ZHANG Hailong, et al. Geochemical features and geological implication of early cretaceous fine-grained biotite alkali-feldspar granite and granite porphyry in the Hongshanzi compound granitic body [J]. Geochimica, 2019, 48(4): 356-369(in Chinese).
- [5] 唐大伟,郭恒飞,牛子良,等.内蒙古红山子—广兴铀成矿亚带二叠系额里图组赋矿层的厘定及其找矿意义[J].东华理工大学学报(自然科学版),2020,43(4):355-363.
TANG Dawei, GUO Hengfei, NIU Ziliang, et al. Determination of the ore-forming layer of the permian

- elitu formation in the Hongshanzi-Guangxing uranium metallogenic sub-belt and its prospecting significance[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 43 (4): 355-363 (in Chinese).
- [6] 董小宇,王常东,林天发,等. 内蒙古广兴-芝瑞盆地上伙房地段铀-钼成矿背景及控矿因素浅析[C]//中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会. 第二届全国矿产勘查大会论文集:地质学. 威海:[出版者不详], 2023:486-489.
- [7] 朱卫平,刘诗华,朱宏伟,等. 常用地球物理方法勘探深度研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2608-2618.
ZHU Weiping, LIU Shihua, ZHU Hongwei, et al. Study on exploration depth of common geophysical methods[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2608-2618(in Chinese).
- [8] 苏晓波,王殿学,徐红军,等. 时间域激发极化法在内蒙古小牛群铜多金属矿的应用[J]. 矿产勘查, 2020, 11(5):970-976.
SU Xiaobo, WANG Dianxue, XU Hongjun, et al. Application of time-domain induced polarization method in the Xiaoniunqun copper-polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(5): 970-976(in Chinese).
- [9] 孙仁斌,楚丽霞,赵绎钧,等. 时间域激发极化法在内蒙古镶黄旗某锌钨多金属矿的应用[J]. 地质与勘探, 2017, 53(3):519-527.
SUN Renbin, CHU Lixia, ZHAO Yijun, et al. Application of time-domain induced polarization method in a zinc-tungsten polymetallic deposit in Xianghuang Banner, Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(3):519-527(in Chinese).
- [10] 王志宏,全旭东,王利民,等. 综合物探方法在硬岩型铀矿勘查中的应用研究[J]. 铀矿地质, 2015, 31(2):110-120.
WANG Zhihong, QUAN Xudong, WANG Limin, et al. Application research of comprehensive geophysical methods in hard rock type uranium deposit exploration[J]. Uranium Geology, 2015, 31(2): 110-120(in Chinese).
- [11] 陆桂福,刘瑞德. 大功率激电和 CSAMT 在隐伏矿产勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(5): 921-924.
LU Guifu, LIU Ruide. Application of high-power induced polarization and CSAMT in concealed mineral exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5):921-924(in Chinese).
- [12] 孟凡兴,乔勇,胡鉴,等. 可控源音频大地电磁测量在花岗岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(3):488-492.
MENG Fanxing, QIAO Yong, HU Jian, et al. Application of controlled-source audio-frequency magnetotelluric survey in granite-type uranium deposit exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3):488-492(in Chinese).
- [13] 杨栋栋,薛成. 山东日照马家庄钼矿地质、地球化学综合找矿效果及找矿方向[J]. 矿产勘查, 2020, 11(3):517-523.
YANG Dongdong, XUE Cheng. Comprehensive prospecting effect and prospecting direction of geology and geochemistry for the Majiazhuang molybdenum deposit in Rizhao, Shandong[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(3):517-523(in Chinese).
- [14] 吴燕清,王世成,丁园,等. 氦气及 CSAMT 联合探测在内蒙古五十家子盆地铀矿勘查中的应用研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(4):726-733.
WU Yanqing, WANG Shicheng, DING Yuan, et al. Application research of radon gas and CSAMT joint detection in uranium deposit exploration of the Wushijiazzi Basin, Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4):726-733(in Chinese).
- [15] 陈放,胡志伟,毛广振,等. 地球物理测井在准噶尔盆地车排子地区铀矿勘查中的应用[J/OL]. 铀矿冶, 1-10 [2025-08-04]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.04.12>.
CHEN Fang, HU Zhiwei, MAO Guangzhen, et al. Application of geophysical logging for uranium exploration in Chepaizi area, Junggar Basin[J/OL]. Uranium Mining and Metallurgy, 1-10 [2025-08-04]. <https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2025.04.12>(in Chinese).
- [16] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 26(1):1-28.
PAN Guitang, XIAO Qiaohui, LU Songnian, et al. Division of tectonic units in China[J]. Chinese Geology, 2009, 26(1):1-28(in Chinese).
- [17] 于兵,王常东,余弘龙,等. 综合物探测量在大兴安岭南段炒米房地区铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2022, 58(5):1070-1081.
YU Bing, WANG Changdong, YU Honglong, et al. Application of comprehensive geophysical survey to uranium prospecting of the Chaomifang area

- in the southern section of Daxing'an Mountains [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5): 1071-1081(in Chinese).
- [18] 苗安中. 综合物探方法在大营子铀钼矿勘查中的应用[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(9): 2297-2305.
MIAO Anzhong. Application of comprehensive geophysical prospecting methods to the exploration in Dayingzi uranium-molybdenum deposits[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(9): 2297-2305(in Chinese).
- [19] 俞胜, 蒙轸, 尤关进, 等. 物化探综合找矿方法在西口沟钼矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(5): 838-845.
YU Sheng, MENG Zhen, YOU Guanjin, et al. Application of integrated geophysical and geochemical methods to prospecting of the Xikougou molybdenum deposit[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(5): 838-845(in Chinese).
- [20] 白德胜, 李水平, 纵瑞, 等. 豫西董家塍构造蚀变岩型银矿物化探异常特征及找矿模型[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 241-253.
BAI Desheng, LI Shuiping, ZONG Rui, et al. Geophysical and geochemical anomalies and ore prospecting model for the Dongjianshan structural altered rock type silver deposit in western Henan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 241-253(in Chinese).
- [21] 杨海涛, 刘新伟, 汪超, 等. 蟒西寺沟斑岩-矽卡岩型钨钼矿物化探异常特征及找矿模型[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(5): 929-939.
YANG Haitao, LIU Xinwei, WANG Chao, et al. Geophysical and geochemical anomaly characteristics and ore prospecting model for the Sigou porphyry-skarn type tungsten-molybdenum deposit in Mangxi area[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5): 929-939(in Chinese).
- [22] 张家乐, 罗强, 胡鹏, 等. 土壤元素地球化学测量在樟岭地段铀-多金属矿勘查中的应用[J]. *世界核地质科学*, 2024, 41(3): 531-539.
ZHANG Jiale, LUO Qiang, HU Peng, et al. Application of soil element geochemical survey in the exploration of uranium polymetallic deposits in Zhangling section [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(3): 531-539(in Chinese).
- [23] 俞炳安, 司庆红, 彭胜龙. 砂岩型铀矿综合探测技术和实践: 以二连盆地 BYH 铀矿为例[J]. *华北地质*, 2024, 47(3): 23-35.
YU Reng'an, SI Qinghong, PENG Shenglong. Comprehensive exploration techniques and practices for sandstone type uranium deposit: A case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin [J]. *North China Geology*, 2024, 47(3): 23-35(in Chinese).
- [24] 邵文星, 金尚刚, 何彦南, 等. 综合物探方法在湖北大冶鸡冠咀铜金矿深部及外围找矿中的应用[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(4): 1010-1025.
TAI Wenxing, JIN Shanggang, HE Yannan, et al. Application of integrated geophysical methods to prospecting in the deep subsurface and peripheral area of the Jiguanzui copper-gold deposit in Daye of Hubei Province [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(4): 1010-1025(in Chinese).
- [25] 张利明, 凌丹丹. 高精度磁测在多金属矿整装勘查区成矿规律研究中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(3): 1145-1152.
ZHANG Liming, LING Dandan. The application of high-precision magnetic survey in the study of metallogenic laws in polymetallic mineral deposit exploration areas [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1145-1152(in Chinese).
- [26] 李飞, 董浩, 崔志强, 等. 滩涂区综合地球物理调查技术在拼茶河断裂空间展布中的应用[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 566-579.
LI Fei, DONG Hao, CUI Zhiqiang, et al. Application of integrated geophysical survey technology in the spatial distribution of Benchaha Fault in Rudong mudflat area, Jiangsu Province [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(3): 566-579(in Chinese).
- [27] 刘钧沅, 党伟民, 赵振华, 等. 综合物探方法在中非加丹加铜钴矿带上的勘查效果分析[J]. *矿产勘查*, 2023, 14(7): 1096-1105.
LIU Junyaun, DANG Weimin, ZHAO Zhenhua, et al. Analysis on prospecting effect of comprehensive geophysical prospecting method in Katanga Cu-Co ore belt of Central Africa [J]. *Mineral Exploration*, 2023, 14(7): 1096-1105(in Chinese).
- [28] 谢国胜, 罗伟锋. 激电中梯和激电测深在广西泗龙铅锌矿的应用[J]. *湖南有色金属*, 2025, 41(1): 4-7.
XIE Guosheng, LUO Weifeng. The application of IP mid-ladder and IP sounding methods to the silong lead-zinc district in Guangxi [J]. *Hunan Non-ferrous Metals*, 2025, 41(1): 4-7(in Chinese).
- [29] 庞新龙, 燕军利, 余继峰, 等. 山东莒县果庄地区物化探特征及找矿前景[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(3): 561-572.

- PANG Xinlong, YAN Junli, YU Jifeng, et al. Geophysical and geochemical characteristics and prospecting potential of the Guozhuang area, Juxian County, Shandong Province [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(3): 561-572 (in Chinese).
- [30] 李富, 周洪福, 唐文清, 等. 物化探方法在隐伏活动断裂探测中综合研究: 以安宁河秧财沟断裂为例 [J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(3): 1199-1205.
- LI Fu, ZHOU Hongfu, TANG Wenqing, et al. Comprehensive study of geophysical and geochemical methods in detecting buried active faults: Taking the Yangcaigou Fault in Anning River as an example [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1199-1205 (in Chinese).
- [31] 宋明春, 宋英昕, 李杰, 等. 深部矿阶梯找矿方法: 以胶东金矿集区深部找矿为例 [J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 1-15.
- SONG Mingchun, SONG Yingxin, LI Jie, et al. Stepwise prospecting method for deep-seated deposits: Take deep prospecting of ore concentration area of gold in Jiaodong Peninsula, China as an example [J]. *Geology in China*, 2022, 49(1): 1-15 (in Chinese).
- [32] 莫亚军, 区小毅, 刘伟文, 等. CSAMT 在广西浦北县新华矿区深部找矿中的应用研究 [J]. *矿产勘查*, 2024, 15(4): 612-622.
- MO Yajun, OU Xiaoyi, LIU Weiwen, et al. Application of CSAMT in deep prospecting in Xinhua mining area, Pubei County, Guangxi [J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(4): 612-622 (in Chinese).
- [33] 王崇龙. 可控源音频大地电磁、瞬变电磁和微动数据的横向约束联合反演 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2023.
- [34] 余弘龙, 于兵, 牛子良, 等. CSAMT 测量在林西县曹家营子地区铀矿勘查中的应用 [J]. *矿产勘查*, 2021, 12(11): 2249-2257.
- YU Honglong, YU Bing, NIU Ziliang, et al. Application of CSAMT survey in uranium exploration in Caojiayingzi area of Linxi County [J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(11): 2249-2257 (in Chinese).

Integrated Geophysical-Geochemical Method and Mineral Prospecting Model for Uranium-Molybdenum Exploration in Shanghuofang Area, Inner Mongolia

WANG Shicheng, YU Bing, WANG Changdong, HAO Xiaofei, DONG Xiaoyu,
LIN Tianfa, YU Honglong

(Geological Party No. 243, CNNC, Chifeng 024000, China)

Abstract: The Guyuan-Hongshanzi area is a prominent uranium metallogenic belt in northern China, with the Hongshanzi pluton situated in its northern segment. In the eastern Shanghuofang area of the pluton, an integrated prospecting approach combining geological, geochemical, and geophysical methods was employed. By employing soil geochemistry and radon gas measurement techniques, geochemical anomalies were identified and the exploration area was effectively constrained. These anomalies were further analyzed in conjunction with induced polarization data, highlighting zones characterized by high resistivity and high chargeability, as well as the morphological features of high-precision ground magnetic anomalies. This integrated approach facilitated the interpretation of the structural framework in the Shanghuofang area. Induced polarization sounding provided insights into the spatial configuration of deep-seated anomalies, while controlled-source audio magnetotelluric (CSAMT) sounding delineated favorable zones for mineralization at greater depths, thereby enabling accurate spatial prediction of uranium-molybdenum ore bodies. Drilling validation confirmed the presence of multiple uranium-molybdenum ore bodies. The comprehensive geological, geochemical and geophysical prospecting process and prospecting model in Shanghuofang area were summarized and established, which provided the prospecting direction for uranium polymetallic ore exploration in this area.

Key words: uranium-molybdenum ore; geophysical-geochemical method; Hongshanzi pluton; prospecting direction; prospecting mode